

Трёхмерное моделирование дифракции импульсного лазерного пучка на бинарном дифракционном оптическом элементе

А.В. Игнатьев^а

^а Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443001, ул. Молодогвардейская, 151, Самара, Россия

Аннотация

В настоящей работе проводится трёхмерное моделирование прохождения сфокусированного импульсного Гауссова пучка через бинарные фазовые оптические элементы. Один из элементов представляет собой фазовый скачок вдоль одной оси и предназначен для разделения падающего пучка на два близлежащих световых пятна. Второй элемент имеет фазовый скачок по двум осям и предназначен для разделения на четыре близлежащих световых пятна. Моделирование выполняется на основе метода конечных разностей во временной области, реализованного в программном обеспечении МЕЕР.

Ключевые слова: импульсный Гауссов пучок; бинарный оптический элемент; метод конечных разностей во временной области

1. Введение

Одним из важнейших достижений лазерных технологий является возможность генерации очень коротких лазерных импульсов, которые нашли широкое применение в обработке материалов [1-4]. При этом часто требуется структурировать гауссов пучок – разделять, размножать, формировать определенные конфигурации. Наиболее широкий спектр пространственных преобразований лазерного излучения обеспечивают средства дифракционной оптики [5, 6]. Чаще всего используются дифракционные решётки и пространственные модуляторы света [7, 8]. Однако структура дифракционных элементов такова, что изготовленный микрорельеф является оптимальным для монохроматического излучения. Спектральная дисперсия, сопровождающая короткие лазерные импульсы, приводит к различным искажениям, которые необходимо учитывать [9-11].

Большинство теоретических и численных исследований в этой области основано на методе разложения по плоским волнам. Однако этот метод не позволяет учитывать трёхмерную структуру элементов, через которые проходит импульсный пучок. Одним из способов решения этой проблемы является моделирование с использованием метода конечных разностей во временной области (метода FDTD).

В настоящей работе проводится моделирование прохождения импульсного гауссова пучка через фазовый оптический элемент, предназначенный для деления падающего пучка на два близкорасположенных световых пятна. Задача формирования нескольких световых пятен на пределе дифракционного разрешения [9-11] имеет место при абляции. В данной работе моделирование выполнено на основе метода FDTD, реализованного в программном обеспечении МЕЕР [12].

2. Теоретические основы

Для упрощения рассматриваемой модели будем считать, что на вход подается сигнал, разделимый по пространственной и временной координатам:

$$U_0(x, y, z, t) = U_s(x, y, z)U_t(t), \quad x \in [-a, a], \quad y \in [-b, b], \quad z \in [-d, d], \quad t \in [-\tau, \tau]$$

Волновое число k_0 для основной частоты будет представляться в виде

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} = \frac{\omega_0}{c},$$

а частота:

$$\omega = kc = \frac{2\pi c}{\lambda}, \quad (1)$$

где c - скорость света.

Применяя прямое преобразование Фурье к функции по временной координате $U_t(t)$, получим:

$$A_t(\omega) = \int_{-\tau}^{\tau} U_t(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2)$$

Подставляя соотношение (1) в уравнение (2) получим:

$$A_t(k) = \int_{-\tau}^{\tau} U_t(t) e^{-ikct} dt, k \in [k_0 - \Delta k, k_0 + \Delta k] \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) называют уравнениями частотно-временного спектра.

Прделаем эту же процедуру для функции по пространственной координате $U_s(x, y, z)$, тогда получим уравнение:

$$A_s(\alpha, \beta, k, z) = \int_{-a}^a \int_{-b}^b U_s(x, y, z) e^{-ik(\alpha x + \beta y + \sqrt{1-\alpha^2-\beta^2}z)} dx dy, \alpha \in [-1, 1], \beta \in [-1, 1] \quad (4)$$

Уравнение (4) называют уравнением частотно-пространственного спектра.

Тогда поле на расстоянии z от входной плоскости примет вид:

$$U(x, y, z, t) = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{k_0-\Delta k}^{k_0+\Delta k} A_s(\alpha, \beta, k, z) A_t(k) e^{ik(\alpha x + \beta y + z\sqrt{1-\alpha^2-\beta^2} - ct)} d\alpha d\beta dk \quad (5)$$

Приведенные выше выкладки соответствуют методу разложения по плоским волнам. Однако этот метод не позволяет учитывать трёхмерную структуру элементов, через которые проходит импульсный пучок. Одним из способов решения этой проблемы является моделирование с использованием метода конечных разностей во временной области.

3. Результаты моделирования

В данном разделе приведены результаты численного моделирования прохождения сфокусированного импульсного Гауссова пучка через бинарный оптический элемент, выполняющим пространственное деление пучка на две части.

Выполним трехмерное моделирование. Толщину слоя PML выберем равной 1 мкм. Размер расчетной области $24 \text{ мкм} \times 8 \text{ мкм} \times 8 \text{ мкм}$. Для этого предположим, что входная функция факторизуется по пространству и времени.

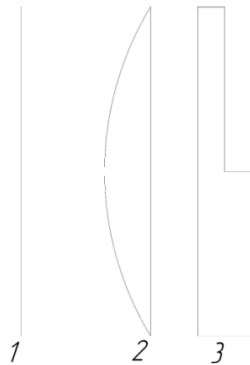


Рис. 1. Схема оптической установки.

На рисунке 1 изображена схема оптической установки. Под цифрой 1 обозначена место на расстоянии $z = 1 \text{ мкм}$, где генерируется входной Гауссов пучок, который записывается в виде:

$$A(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, $\sigma = 4 \text{ мкм}$.

Под цифрой 2 изображена линза, которая имеет сферическую и плоскую поверхности. Материал линзы – стекло с показателем преломления $n = 1,5$. Радиус сферической поверхности равен $R = 12 \text{ мкм}$, тогда фокусное расстояние линзы равно: $f \approx 24 \text{ мкм}$. Толщины линзы $d = 3,5 \text{ мкм}$. Линза расположена на расстоянии 7 мкм от плоскости генерации светового излучения.

Под цифрой 3 изображен фазовый элемент, который осуществляет скачок фазы на π радиан. Он состоит из двух пластин. Толщина первой пластины равна 1 мкм. А толщина второй пластины вычисляется по формуле:

$$h = \frac{\lambda}{2(n - n_0)} = \frac{\lambda}{2(n - 1)}$$

Так, как у нас стекло с показателем преломления $n = 1,5$, то толщина второй пластины равна длине волны $h = \lambda$. Фазовый элемент находится на расстоянии 1,5 мкм от линзы.

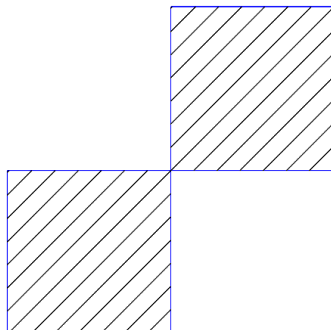


Рис. 2. Схема бинарного элемента.

Также в работе производится расчет другого бинарного элемента, схема которого изображена на рис. 2. Толщина пластин одинакова и вычисляется по аналогичной формуле:

$$h = \frac{\lambda}{2(n - n_0)} = \frac{\lambda}{2(n - 1)}$$

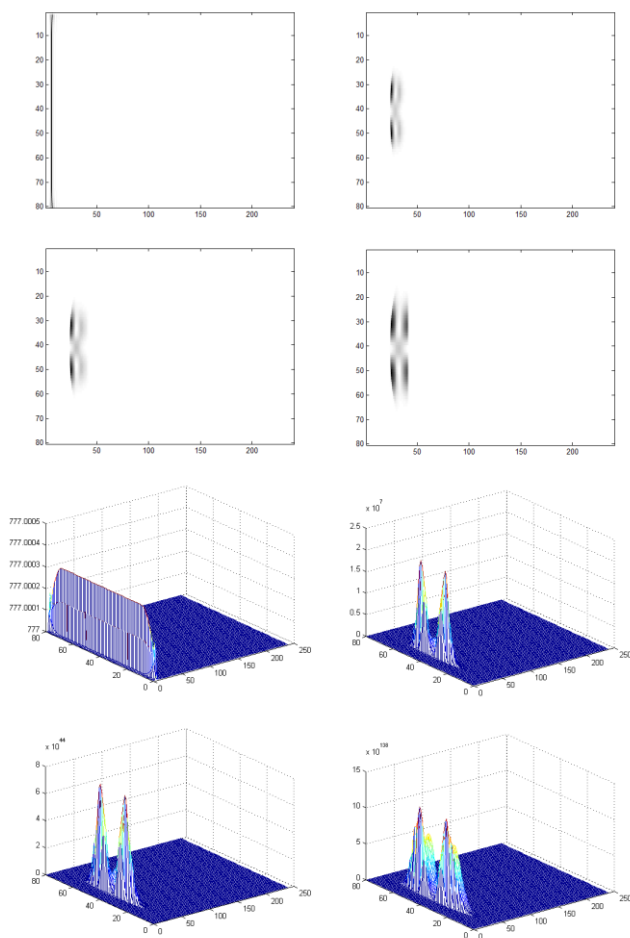


Рис. 3. Результат моделирования.

Длина волны падающего излучения $\lambda = 0,8 \text{ мкм}$. Импульс задается следующей формулой:

$$A(t) = \exp\left\{-\frac{(t-t_0)^2}{2w^2}\right\} \exp\{i\omega(t-t_0)\} \quad (7)$$

где $\omega = 2\pi c/\lambda$, $w = 3 \text{ фс}$.

Полученные картины одинаковы для одного направления оси.

Как видно из результатов моделирования, изображенных на рис. 3, короткий фемтосекундный импульсный пучок успешно делится на две части с помощью бинарного дифракционного элемента.

4. Заключение

Моделирование прохождения сфокусированного импульсного гауссова пучка через фазовый оптический элемент методом FDTD показал заметные искажения, которые появляются в области фокуса, по сравнению с постоянным излучением. Однако характерные особенности структуры формируемого пучка, в частности, нулевое значение интенсивности, связанное с фазовой сингулярностью, вносимой дифракционным элементом, сохраняются.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, а также грантов РФФИ №16-07-00825, №16-37-00241.

Литература

- [1] Cheng, J. A review of ultrafast laser materials micro-machining / J. Cheng, C. Liu, S. Shang, D. Liu, W. Perrie, G. Dearden and K. Watkins // Optics and Laser Technology. – 2013. – Vol. 46. – P. 88-102
- [2] Sun, H.-B. Two-photon photopolymerization and 3D litho-graphic microfabrication / H.-B. Sun, S. Kawata // Advances in Polymer Science. – 2004. – Vol. 170. – P. 169-273.
- [3] Заярный, Д.А. Наномасштабные процессы кипения при одноимпульсной фемтосекундной лазерной абляции золотых пленок / Заярный Д.А., Ионин А.А., Кудряшов С.И., Руденко А.А., Бежанов С.Г., Урюпин С.А., Канавин А.П., Емельянов В.И., Алферов С.В., Хонина С.Н., Карпеев С.В., Кучмижак А.А., Витрик О.Б., Кульчин Ю.Н., Макаров С.В. // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2015. – Т. 101, № 5-6. – С. 428-432
- [4] Kuchmizhak, A. On-fly femtosecond-laser fabrication of self-organized plasmonic nanotextures for chemo- and biosensing applications / A. Kuchmizhak, E. Pustovalov, S. Syubaev, O. Vitrik, Y. Kulchin, A. Porfirev, S. Khonina, S. I. Kudryashov, P. Danilov, A. Ionin // ACS Appl. Mater. Interfaces, 2016, V. 8, No. 37, pp. 24946-24955
- [5] Дифракционная компьютерная оптика / Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина. – Под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2007. – 736 с.
- [6] Дифракционная нанофотоника / А.В. Гаврилов, Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, П.Н. Дьяченко, А.А. Ковалёв, В.В. Котляр, А.Г. Налимов, Д.В. Нестеренко, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина, Я.О. Шушупова. – Под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2011. – 680 с.
- [7] Kuroiwa, Y. Arbitrary micropatterning method in femtosecond laser microprocessing using diffractive optical elements / Y. Kuroiwa, N. Takeshima, Y. Narita, S. Tanaka and K. Hirao // Optics Express. – 2004. – Vol. 12(9). – P. 1908-1915.
- [8] Hayasaki, Y. Variable holographic femtosecond laser processing by use of a spatial light modulator / Y. Hayasaki, T. Sugimoto, A. Takita and N. Nishida // Applied Physics Letters. – 2005. – Vol. 87(3). – P. 031101.
- [9] Алферов, С.В. О возможности управления лазерной абляцией при острой фокусировке фемтосекундного излучения / Алферов С.В., Карпеев С.В., Хонина С.Н., Тукмаков К.Н., Моисеев О.Ю., Шуляпов С.А., Иванов К.А., Савельев-Трофимов А.Б. // Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44, № 11. – С. 1061-1065
- [10] Карпеев, С.В. Исследование влияния широкополосного излучения на распределение интенсивности, формируемое дифракционным оптическим элементом / Карпеев С.В., Алферов С.В., Хонина С.Н., Кудряшов С.И. // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 689-694
- [11] Хонина, С.Н. Исследование фокусировки в близкорасположенные световые пятна при освещении дифракционных оптических элементов коротким импульсным лазерным пучком / Хонина С.Н., Дегтярев С.А., Порфирьев А.П., Моисеев О.Ю., Полетаев С.Д., Ларькина С.С., Савельев-Трофимов А.Б. // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 187-196
- [12] Oskooi, A.F. Meep: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method / Oskooi A.F., Roundy D., Ibanescu M., Bermel P., Joannopoulos J.D. and Johnson S.G. // Computer Physics Communications. – 2010. – V. 181. – P. 687-702
- [13] Котляр, В.В. Обобщенные Эрмитовы световые пучки в свободном пространстве / Котляр В.В., Сойфер В.А., Хонина С.Н. // Компьютерная оптика. – 1997. – Т. 17. – С. 31-36.
- [14] Хонина, С.Н. Саморепродукция многомодовых пучков Гаусса-Эрмита / Хонина С.Н., Котляр В.В., Сойфер В.А. // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25, № 12. – С. 62-69
- [15] Хонина, С.Н. Экспериментальное формирование и селекция мод Гаусса-Эрмита с помощью ДОО / Хонина С.Н. // Компьютерная оптика. – 2002. – Т. 23. – С. 15-22
- [16] Хонина, С.Н. Исследование поляризационной чувствительности ближнепольного микроскопа с использованием бинарной фазовой пластины / Хонина С.Н., Алферов С.В., Карпеев С.В., Моисеев О.Ю. // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 3. – С. 326-331